

面向导弹贮存延寿的 PHM 技术与工程应用

马凌, 李俊, 赵韶平, 张永久

(北京市海淀区西北旺镇北清路 109 号 203 分队, 北京 100094)

摘要: **目的** 通过应用故障预测和健康管理(PHM)技术,实现导弹武器的可靠寿命预测和健康管理。**方法** 在分析国内外现状的基础上,对某型导弹贮存延寿的系统架构进行设计,并对工程应用中的数据采集、寿命退化分析、预测方法,以及使用和贮存寿命预测等主要过程的技术途径和研究方法进行论述。**结果** 工程应用证明了 PHM 技术在导弹贮存延寿中的可行性,相关关键技术也存在有效的解决方法。**结论** 面向导弹贮存延寿的 PHM 技术体系在实现导弹武器全寿命周期管理和寿命科学评价的同时,能够有效降低装备的延寿升级经济成本。

关键词: 贮存延寿; 寿命预测; 故障预测与健康管理的

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.04.009

中图分类号: TP277;V57 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)04-0042-07

PHM Technique Studies and Engineering Applications Faced to Missile Storage and Life Extension

MA Ling, LI Jun, ZHAO Shao-ping, ZHANG Yong-jiu

(Division 203, 109 of Beiqinglu Road, Town of Xibeilvang, Haidian District, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: Objective To realize the reliable life prediction and health management of missile weapons, though the use of the technology of the application of fault prediction and health management (PHM). **Methods** Based on analysis of the status of domestic and overseas, the storage and life-extending system architecture of a certain type of missile was designed. Technological approaches and research methods were discussed which were in the main processes of engineering application such as data collecting, life degradation analysis and prediction method. **Results** The engineering application proved the feasibility of PHM technology in storage and life extension of the missile, and the related key technology also could be solved effectively. **Conclusion** The PHM technology system which is oriented to the storage and life extension of missiles can realize the life cycle management of missile weapon and the scientific evaluation, at the same time, it can effectively reduce economic cost . of life extending and upgrade of equipment.

KEY WORDS: storage and life extension; life prediction; PHM

收稿日期: 2014-06-03; 修订日期: 2014-06-18

Received : 2014-06-03; Revised : 2014-06-18

作者简介: 马凌(1976—),女,湖北人,硕士,助理研究员,主要研究方向为信息工程、预测与健康管理的。

Biography: MA Ling(1976—), Female, from Hubei, Master, Research assistant, Research focus: information technology, calculating & healthy management.

导弹作为大型复杂武器系统,其性能、寿命的保持与恢复,对部队战斗力提升,乃至经济提升具有重大的现实意义。近年我国部分导弹武器装备面临陆续到达设计寿命末期,甚至已有装备超期服役的问题,准确掌握哪些装备可以继续服役、继续服役时间,以及哪些装备需要开展有效的维修以实现性能质量恢复,已经成为部队贮存延寿工作的关键任务^[1-8]。

由于部分历史型号产品设计更多强调使用功能与战技指标的实现,忽略了装备的测试性、维修性、保障性设计与试验验证,使得相关产品往往只能通过可靠性试验、寿命评价的方法实现贮存延寿,导致其寿命评价准确性、工程化经济性都存在不足^[9]。

1 面向贮存延寿的导弹 PHM 系统架构

目前,美国等军事强国,先后提出了完整的飞

机、航天器的故障预测与健康管理体系,应用于武器装备的全寿命周期保障。以美国空军 JSF-35^[10]的自主健康管理系统、NASA 的深空探测器 IVHM^[11]系统为例,两者已分别已经取得了明显的军事效益与经济效益。其中,JSF-35 的自主健康管理系统 LM-STAR 由机载 PHM 和地面 PHM 组成,机载部分主要负责健康状态的采集、判定、存储、综合,地面 PHM 系统负责报警处理、寿命预测、维修保障等综合决策,其体系主要采用了 OSA-CBM+的架构,如图 1 所示。

近年来,某型导弹装备的研制采用大量的信息化技术,在实现导弹的长寿命、高可靠设计的同时,也为面向导弹贮存延寿的 PHM 技术应用提供了必要的支撑。根据该型导弹特点,面向贮存延寿的 PHM 系统架构如图 2 所示。

系统架构主要由弹载和车载(或地面)两个部分组成,每部分都有对应的 PHM 系统和相关硬件、

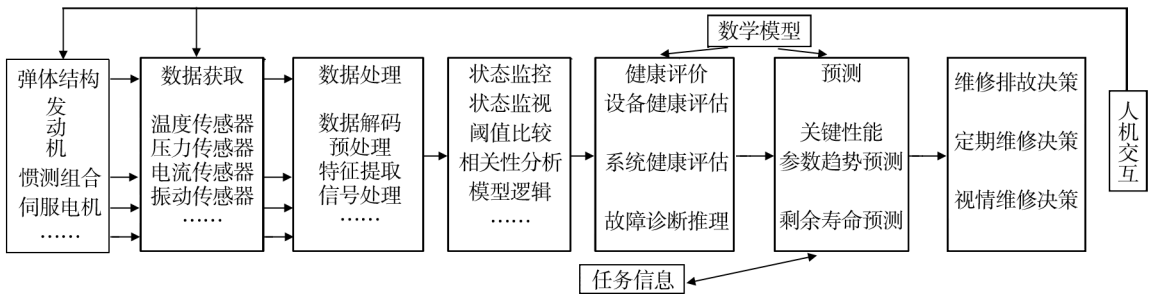


图 1 OSA-CBM+技术架构

Fig. 1 OSA-CBM+ technology architecture

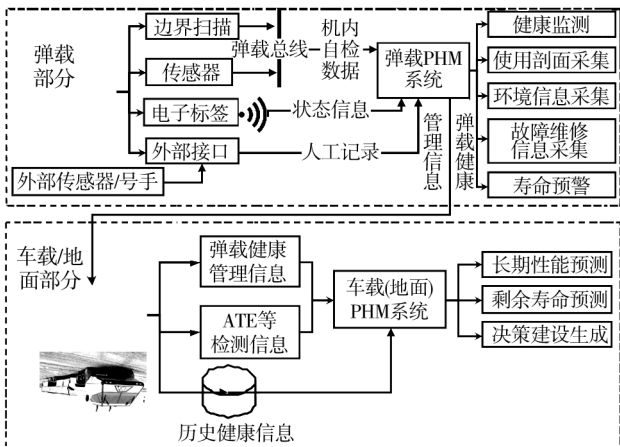


图 2 面向贮存延寿的导弹 PHM 系统架构

Fig. 2 PHM system architecture of missile storage and life extension

软件,只是功能侧重不同。

弹载部分:数据采集硬件,包括标准边界扫描芯片、传感器、电子标签等,实现导弹的状态信息采集、环境信息采集、机内信息自检以及综合信息采集与记录;数据存储与寿命预警软件,利用嵌入式技术,实现导弹综合寿命信息存储,并通过外接便携式终端的方式实现在测试过程的寿命报警。

车载/地面部分:数据采集硬件,包括 ATE 检测设备,弹载健康管理信息、历史健康信息等必须的传输、存储设备;预测及决策软件,包括性能预测、寿命预测和决策软件。预测软件提供数据预测、物理模型预测等综合应用,实现周期预测控制系统、动力系统、惯导系统等导弹关键短板的寿命水平;决策软件根据导弹及各关键的分系统、设备等寿命短板的设

计指标以及三级维修体制,提供更换、整修等决策建议。

2 工程应用

2.1 导弹全寿命周期数据采集

采集全寿命周期数据,确保影响、表征导弹寿命数据的有效性、统一性、完整性是贮存延寿工程的难题之一。文中提出的PHM系统架构着眼解决数据采集问题,其技术途径如图3所示。

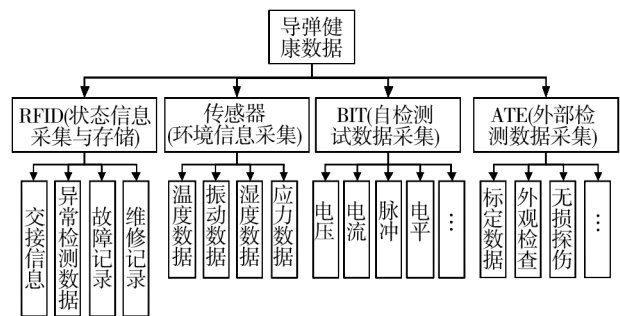


图3 导弹全寿命周期数据采集技术途径

Fig.3 Technological approaches of missile life cycle data collection

1) 状态信息采集与存储:利用电子标签,实现装备设计、测试、贮存、测试、维修过程中重要信息的记录与管理。利用其中记录的导弹异常测试数据、环境记录、历史故障以及维修状态,为导弹长期的寿命预测以及贮存延寿提供必要的分析数据与决策依据。

2) 环境信息采集:利用温度、振动、湿度、应力、化学等传感器,实现影响导弹寿命水平的数据采集。该部分数据将为后续基于物理模型的寿命预测提供输入,为基于数据驱动的寿命预测以及贮存延寿决策提供依据。

3) 自检测试数据采集:利用导弹的总线测试手段,实现在日常的整弹测试中,获取整弹关键性能参数(例如,电压、电流、脉冲计数、电平、油液高度等)以及加电时间、开关次数等使用数据采集,为寿命预测提供输入。该部分的采集数据可通过现场便携式采集终端进行存储,并通过网络收集至车载(地面)PHM系统。

4) 外部检测数据采集:该部分区别于BIT测试,主要利用外部的ATE、工业CT等专用测试设备实现导弹关键分系统、设备的单元测试,弥补BIT测试无法覆盖的部分性能数据。例如,弹体结构裂纹检测、发动机工业CT检测、制导系统标定等。

以上4类数据的采集,可为后续装备的寿命预警、剩余寿命预测提供必要数据支撑,覆盖每个装备寿命周期。

2.2 导弹武器寿命退化分析

导弹武器系统,由弹体结构、弹头、制导系统、控制系统、伺服机构、电子仪器以及发射车组成,不同系统的寿命影响因素以及寿命退化趋势存在差异。通过以往使用与保障经验,总结一般寿命短板如图4所示。

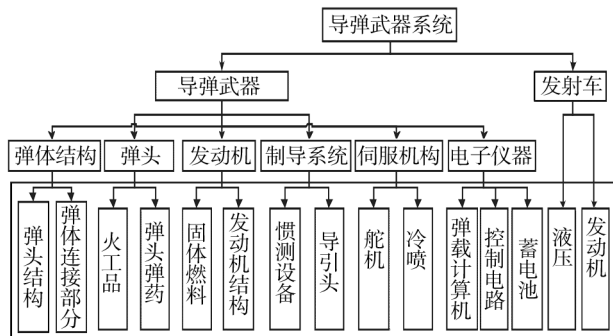


图4 导弹武器系统寿命短板

Fig.4 Life shortcomings of missile weapon system

1) 弹体结构。弹头在发射后将经历高速的空气阻力摩擦,是导弹安全防护的关键。长期贮存中受到温度、湿度等影响,其材料可能出现分解、退化。导弹在吊装、值班过程中,产生的拉伸力可能对导弹的结构强度造成破坏,同样可能带来飞行过程的安全问题。

2) 弹头。长期贮存的温度、湿度,可能造成引爆火工品以及不同技术状态的弹药化学性能退化,导致点火、毁伤不足。

3) 发动机。温度、振动、湿度,对发动机的结构强度、密封性、装药量等产生影响,影响整个导弹的飞行距离。

4) 制导系统。激光惯导中的激光发射器功率、精度随着光纤材料的退化而退化,惯性制导的胶粘剂受温度、振动影响出现漂移。导引头的天线增益

长期贮存,同样存在漂移。

5) 伺服机构。贮存、加电测试过程,温度、振动产生机械设备的摩擦、共振,导致机械执行精度降低。

6) 电子仪器。弹载计算机、控制电路受温度、湿度、振动等影响产生开路、短路等故障,造成数字电路的失效到寿。蓄电池组长期的化学材料退化导致内阻增大,储能降低。

通过以上分析可知,导致弹上关键设备、仪器失效的原因主要集中在温度、湿度、振动等外部环境以及自身材料退化,这就是导弹的寿命短板,需要建立有效的数据采集手段,保证必要的寿命预测支撑。

2.3 导弹寿命预测方法研究

根据导弹寿命短板分析可知,开展导弹的贮存延寿应围绕以上机电、电子、机械、材料分别开展有针对性的预测分析,以实现关键设备的寿命预测与整弹剩余寿命评价。

传统基于可靠性的寿命评价主要利用多个试验产品数据进行统计与事后分析,利用基于统计学指数分布、威布尔分布等进行可靠度预计。面向贮存延寿的 PHM 技术,强调基于实时状态监控条件下的数据分析,可有效提升预测精度与自动化水平。文中重点分析了基于数据驱动以及物理模型的预测方法。基于 PHM 技术架构的导弹剩余寿命预测技术流程如图 5 所示。

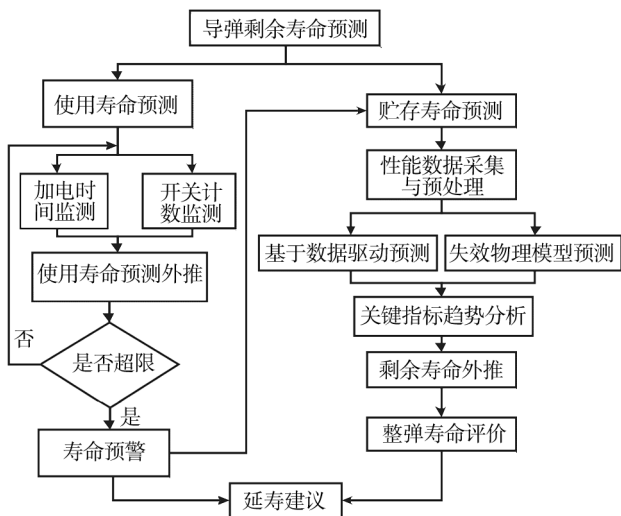


图 5 导弹寿命预测技术流程

Fig. 5 Technique process of missile life prediction

导弹武器贮存寿命预测的最终目的是贮存寿命预测,预测方法科学与否,直接决定了预测结论的准确性和可信度。以往指导导弹武器寿命评估标准为 GJB 3105—97《战略导弹性能评定方法》,经过以往的研究、验证表明,采用指数分布、威布尔分布、正态分布等统计分析方法具有评估误差大的问题。文中重点结合 PHM 技术方向,从状态监控角度提出寿命预测方法。具体包括以下内容。

2.3.1 灰色系统的寿命预测方法

目前,灰色预测模型又称 GM 模型 (Grey Model)。通过建立灰色微分预测模型,对事物发展规律做出模糊性的长期描述,目前主要形式是 GM(1,1) 模型,适合具有单调递增或递减趋势的数列预测。针对导弹实际工程数据分析,测试数据往往随着加电、应力释放等因素影响,使得数据呈现递增与递减交替波动的趋势特征,因此 GM 对预测模型进行改进,改用动态等维 GM(1,1) 模型,实现基于测试数据驱动的动态寿命预测。其主要预测分析流程如图 6 所示。

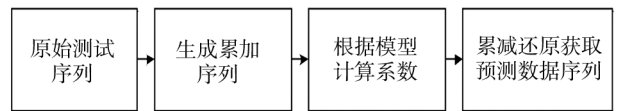


图 6 GM 模型预测流程

Fig. 6 Prediction process of GM model

1) 生成累加序列。选择预测时刻 $t+1$ 的前 n 个采样时刻值作为原始序列 $x^{(0)} = [x^{(0)}(t-n-1), x^{(0)}(t-n-2), \dots, x^{(0)}(t)]$, 进行累加计算生成累加序列 $x^{(1)} = [x^{(1)}(t-n-1), x^{(1)}(t-n-2), \dots, x^{(1)}(t)]$ 。

2) 建立预测模型。由最小二乘法求解预测模型系数,进行累减还原得到预测模型:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1) \\ \hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^{-a}) [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] e^{-a(k-1)} \end{cases}$$

3) 计算 $t+1$ 到 $t+k$ 时刻的预测值。由预测模型的解,得到 $t+1$ 到 $t+k$ 时刻的预测值,在 t 时刻可以看出未来 k 个点的变化趋势,其中 $k < n$ 。

4) 当真实值到达 k 时,可以预测 $t+k+1$ 到 $t+2k$ 时刻的值,这时新的数据更能反应变化趋势,因此将原有预测值覆盖前一步的预测值。

5) 循环 1) — 4) 步骤。以某导弹控制系统为例,其在长期的自然贮存过程中存在着参数漂移的问题,但由于振动、温度等应力影响,使其部分参数存在着长期退化,直至超过退化门限无法恢复后,表征该设备的永久失效、到寿。该产品在寿命中期 3 年的测试数据(D(X)F; X 轴与 G 无关项)如图 7 所示,可以发现,数据本身随着季节温度的影响,表现为周期的上升、下降,但由于其设备内器件、材料的总体退化,其指标表现为总体上升的趋势。通过建立 GM 数据预测模型预测未来稳定性数据,选取 GM(1,1)模型,并在每半年进行预测,经过近 7 次的预测迭代,获得的预测结果如图 7 所示。

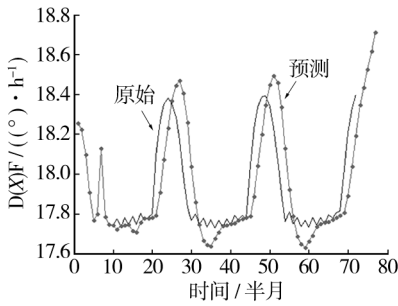


图 7 某导弹控制系统 D(X)F 测试参数 GM 预测

Fig. 7 GM prediction of a certain type missile control system D(X)F test parameters

如图 7 所示,该指标在第 35 个月以后具有明显的上升加速,该指标的上限为 19(°)/h,从总体趋势可见,未来一段时间后将出现指标超差、产品到寿。预测精度采用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MPE)进行评价,分别为 2.732 和 16.3%。根据预测精度分析,对于控制系统具有上下波动的数据采用 GM 预测模型进行动态预测具有较好的预测准确率。由预测结果可见,每次预测的数据与实际数据均具有滞后性,实际工程应用中可采用缩短预测周期与加大测试数据频率的方式,降低预测的时延。另外在预测过程中,根据多次预测与实测值偏差的统计结果,可以计算出预测的置信区间,为延寿分析提供参考。

2.3.2 时间序列寿命预测方法

针对具有相关关系的两组变量,采用回归分析的方法进行分析和预测,常用方法为线性回归。一元线性回归将一个变量与另一个随机变量之间的相关关系用线性函数来表示。若一个随机变量之间与

多个自变量之间存在相关关系,需要采用多线性回归的方法进行分析和预测。实际工程数据存在的某些随机过程与测试数据之间的随机关系难以用任何函数关系式来描述,需要采用这个随机过程本身观测数据之间的依赖关系来揭示这个随机过程的规律性。自回归预测方法就是结合这种思想,在线性回归的基础上推广得到的。

同样以某弹上电气设备的电流测试为例,其电流测试值代表了该产品的精度与稳定性。针对该产品寿命中期开始进行半月均值历史数据序列,建立预测模型并进行每半年周期进行预测,得到预测结果如图 8 所示。

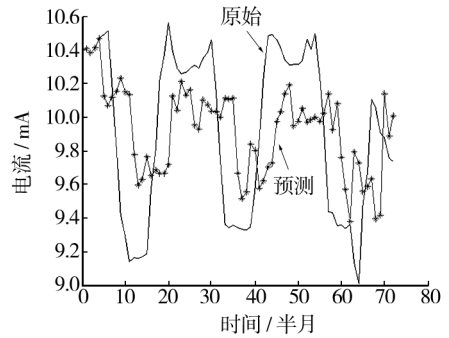


图 8 某导弹电气系统性能测试参数的 AR 预测

Fig. 8 AR prediction of a certain type missile performance test parameters

如图 8 所示,该性能指标在第 30 多个月,其实测值出现了明显的退化(该指标下限为 8)。时间序列寿命预测模型与 GM 模型相比,其预测值具有更大的时延,但其预测值受实测波动影响较小,预测值总体的趋势性更好,因此该方法更适合于长期退化趋势较明显的性能指标预测。预测精度采用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MPE)分别为 0.4612 和 3.63%。

2.4 导弹武器寿命预测

2.4.1 使用寿命

导弹惯测组合、弹上计算机、控制器、伺服机构等电子、机电类设备具有累计加电时间指标要求,而关键设备的开关、工作模式转换具有累计计数要求。两类指标构成了关键弹上设备的使用寿命。

导弹装备交付用户后,任务的机动性使得不同导弹的加电、计数不同,因而各设备的使用寿命水平

不一。对于使用寿命的预测,可通过采集、记录具有使用寿命的设备单机累计加电时间、开关计数等,利用趋势外推模型,预测未来在相似使用频度、剩余使用寿命。针对计算后不满足设计要求的设备或即将使用超限的设备,在弹载 PHM 系统中进行寿命预警,提供未来延寿建议。

2.4.2 贮存寿命

基于物理模型预测方法精度优于基于数据预测方法,但受限于导弹设备的复杂结构,物理模型无法完全适合弹上设备级产品寿命预测。针对弹上设备主要采用基于数据预测方法,而针对弹体材料、结构、关键电子元器件采用基于物理模型预测。

1) 基于数据驱动的弹上设备寿命预测。根据历史故障数据分析,导弹关键性能指标长期的退化趋势具有一定差异,包括了趋势明显和周期震荡两种。其中,舵机漏油率、蓄电池内阻、发动机装药量等,积累影响、失效机理相对简单,数据退化趋势较为明显,对此类性能指标的预测可采用基于时间序列预测模型、基于曲线拟合、非参数回归等预测方法,实现关键指标的预测,并利用预测后的数据与超限门限进行比对,外推剩余寿命水平。对于组成结构复杂的弹上设备,例如惯测组合机电一体化设备,其性能稳定性受到贮存环境下温度、振动以及应力释放影响,使其稳定性具有复杂的变化,表现为数据的周期震荡(例如,轴向与 G 无关系数等)。对于此类性能的预测,可采用基于季节性时序模型进行预测。

2) 基于物理模型寿命预测。由前面分析可知,电子元器件、隔热材料、磁性材料等基础材料、元器件在受到温度、湿度等敏感环境的影响产生性能退化。例如,控制电路中电容器件的容抗退化、弹头隔热材料的拉伸强度、导热系数性能退化等。可分别结合相应专业理论,建立其失效物理模型进行关键性能预测。典型的失效物理模型包括:a) 胶粘剂蠕变。胶粘剂在温度因素下,其应力与形变随时间积累变化,表现为蠕变量、蠕变率、应力等与时间的关系。通过传感器捕获弹体内关键不稳温度升高情况,预测胶粘剂蠕变速度,外推材料剩余寿命,实现关键设备基于短板材料剩余寿命预测。b) 磁钢老化模型。随着时间变化以及温度等环境影响,磁钢磁性能将发生退化。磁性能稳定性影响石英加速度计力矩系数的稳定性。通过磁钢老化模型,可实现其由于磁性能退化导致部件剩余寿命预测。c) 伺

服电路热性能模型。伺服电路的热稳定性主要由其元器件热稳定性决定,且互相具有一定补偿作用。通过典型器件的热稳定性模型进行预测,可实现典型伺服电路的热性能预测,进而给出剩余寿命预测结果。

3 关键技术分析

1) 基于总线的弹载 PHM 集成技术。某型导弹采用总线结构设计,弹载的 RFID 数据存储、传感器数据采集、芯片边界扫描、BIT 数据自检等综合数据均需要通过总线传输与采集控制。基于总线的导弹健康监测网络设计,将传感器、边界扫描、RFID 以及 PHM 板卡综合集成,实现导弹武器的弹载 PHM 系统集成。

2) 基于贫数据的寿命预测技术。新型导弹设计向长寿命、高可靠方向发展,大大降低了导弹寿命周期内的自检、外部 ATE 单元测试。测试数据的减少,将对导弹寿命预测计算带来影响,降低寿命预测精度。贮存延寿过程中,采用基于灰色预测模型的寿命预测方法,可有效降低寿命预测数据量的依赖,提升导弹关键设备性能参数、剩余寿命预测精度。

3) 基于模糊评判的寿命评价技术。导弹组成复杂,不同分系统的重要程度、造价、寿命水平、维修模式不一。例如,实际工程中弹上蓄电池组的到寿与发动机到寿对整弹寿命影响差异巨大。贮存延寿工程中,通过研究基于模糊评判的寿命评价技术,将弹上设备寿命、维修业务、设备成本进行综合建模,实现整弹寿命综合评价,将有效地提升贮存延寿工程的经济性与管理决策能力。

4 结语

面向导弹贮存延寿的 PHM 技术体系采用了世界先进的武器装备综合保障解决方案,通过建立实时性更高、智能化程度更深的数据采集、寿命预测与延寿决策平台,实现导弹武器“设计、使用、维护、维修”的全寿命周期管理。通过对重要导弹武器的状态、环境数据、性能测试数据的集成,实现导弹武器系统的寿命科学评价,在保障装备管理完好率的同时,有效地降低装备的延寿升级经济成本。研究成果对我国相关武器系统贮存延寿工程也具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 李久祥. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- LI Jiu-xiang. Technology of Equipment storage and life extension [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007.
- [2] 杨立峰, 王亮, 冯佳晨. 基于 PHM 技术的导弹维修保障[J]. 海军航空工程学院学报, 2010(4): 447—450.
- YANG Li-feng, WANG Liang, FENG Jia-chen. Maintenance Support of Missile Based on PHM Technology[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010(4): 447—450.
- [3] 何献武, 曾振建, 贾慧, 等. PHM 技术在反舰导弹维修保障中的传感器网络应用研究[J]. 仪器仪表用户, 2007(2): 11—12.
- HE Xian-wu, ZENG Zhen-jian, JIA Hui, et al. Research on PHM Technology Application in Sensor Networks of Anti-ship Missile's Maintenance [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2007(2): 11—12.
- [4] 张泽奇, 刘晓方, 陈曦, 等. 基于 PHM 的导弹状态管理研究[J]. 信息技术, 2010(7): 107—109.
- ZHANG Ze-qi, LIU Xiao-fang, CHEN Xi, et al. Research on Missile State Management Based on PHM [J]. Information Technology, 2010(7): 107—109.
- [5] 胡冬, 谢劲松, 吕卫民. 故障预测与健康管理技术在导弹武器系统中的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(4): 24—30.
- HU Dong, XIE Jin-song, LYU Wei-min. Applications of PHM Technology in Missile Weapon Systems [J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(4): 24—30.
- [6] 王亮, 吕卫民, 冯佳晨. 导弹 PHM 系统中的传感器应用研究[J]. 战术导弹技术, 2011(2): 110—114.
- WANG Liang, LYU Wei-min, FENG Jia-chen. Application of Sensors in Prognostic and Health Management System of Missile [J]. Tactical Missile Technology, 2011(2): 110—114.
- [7] 王春健, 马亮, 范红军. 潜射导弹发射装置故障预测与健康研究[J]. 机械设计与制造, 2012(3): 259—261.
- WANG Chun-jian, MA Liang, FAN Hong-jun. Research of PHM for Launcher of Submarine Launched Missile [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(3): 259—261.
- [8] 洪晟, 陶文辉, 路君里, 等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述[J]. 计算机测量与控制, 2012(4): 862—864.
- HONG Sheng, TAO Wen-hui, LU Jun-li, et al. Maintenance and Supportability of the Missile Weapon Systems Based on Prognostic and Health Management [J]. Computer Measurement & Control, 2012(4): 862—864.
- [9] 孙博, 康锐, 谢劲松, 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007(10): 1762—1767.
- SUN Bo, KANG Rui, XIE Jin-song. Research and Application of the Prognostic and Health Management System [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007(10): 1762—1767.
- [10] ANDREW HESS, LEO FILA. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM Concept: Potential Impact on Aging Aircraft Problems [C]//IEEEAC. 2001. (余不详)
- [11] PARIS E DEUDRE, TREVINO C LUIS, WATSON D Mike. A Framework for Integrated of IVHM Technologies for Integration for Vehicle Management [C]//IEEEAC. 2004. (余不详)
- [12] YANG Zhen-hai, AN Bao-she. Parameter Estimation Based on Binary Date [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1994, 10(2): 142—147.
- [13] 刘礼宾, 程维虎. 阵地弹药贮存可靠性分析及试验数据处理[J]. 数理统计与应用概率, 1998, 13(4): 374—379.
- LIU Li-bin, CHENG Wei-hu. Positions of Ammunition Storage Reliability Analysis and Test Data Processing [J]. Mathematical Statistics and Applied Probability, 1998, 13(4): 374—379.
- [14] 李东阳. 弹药储存可靠性分析与试验评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- LI Dong-yang. Ammunition Storage Reliability Analysis Design and Test Assessment [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2013.
- [15] 杨振海, 程维虎, 张军舰. 拟合优度检验[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- YANG Zhen-hai, CHENG Wei-hu, ZHANG Jun-jian. Goodness of Fit [M]. Beijing: Science Press, 2011.

(上接第 11 页)